



Les impacts des énergies fossiles sur l'environnement

Guy Landrieu

► To cite this version:

Guy Landrieu. Les impacts des énergies fossiles sur l'environnement. 5. Entretiens de la Villette
"L'énergie : un concept des usages des enjeux", Mar 1994, Paris, France. ineris-00971900

HAL Id: ineris-00971900

<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00971900>

Submitted on 3 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES

Les impacts des énergies fossiles sur l'environnement

Guy Landrieu

**Ingénieur au Département
Évaluation, Modélisation, Analyse des Risques**

Document d'Atelier préparé pour

Les Entretiens de la Villette 5

L'énergie : un concept, des usages, des enjeux

Paris, 29 mars - 1^{er} avril 1994

Les impacts des énergies fossiles sur l'environnement

Introduction

La satisfaction de leurs besoins en énergie est l'un des principaux facteurs de la transformation de leur environnement par les sociétés industrielles. Les combustibles carbonés fossiles, qui représentent environ 90% de la production commerciale d'énergie dans le monde, ont un rôle important dans ce processus de transformation.

Une première donnée qui explique l'ampleur des impacts sur l'environnement liés aux combustibles fossiles est l'importance des flux de matières en circulation. On extrait du sous-sol, chaque année, dans le monde, de l'ordre de 8 milliards de tonnes de combustibles fossiles, soit, en 1989, environ 3,5 milliards de tonnes de charbon, 3,1 milliards de tonnes de pétrole et 1,4 milliards de tonnes de gaz. Ces matières premières nécessitent des traitements divers pour les convertir en produits commerciaux. Elles doivent être stockées, transportées sur les lieux de consommation, souvent sur de longues distances. Le transport des combustibles constitue, par exemple, la moitié environ des trafics maritimes. Le fonctionnement des filières d'approvisionnement en combustible représente ainsi une activité considérable et les impacts sur l'environnement sont à l'échelle de cette activité.

Une seconde caractéristique des combustibles fossiles, notamment le pétrole et le charbon, est que, par suite de leur processus de formation, ils sont constitués par des mélanges d'un grand nombre de composés chimiques divers avec une composition qui varie suivant l'origine du gisement ; parmi ces composés, principalement organiques, certains sont des produits toxiques pour l'homme ou pour d'autres organismes vivants. La complexité et la diversité des combustibles fossiles sont un élément important pour expliquer leur impact environnemental.

Un troisième facteur est celui des conditions dans lesquelles, en bout de cycle, ces combustibles complexes réagissent avec l'oxygène de l'air dans une réaction de combustion vive. Cette réaction génère un ensemble de nouveaux composés, dont certains sont toxiques ; d'autres composés se forment encore par transformation ultérieure des produits de combustion... Une part importante du flux des 8 milliards de tonnes/an de combustibles fossiles est brûlée sans que l'on se préoccupe de la composition des produits formés et les produits de combustion sont rejetés sans traitement dans l'environnement, essentiellement dans l'atmosphère.

Les voies par lesquelles l'homme, en faisant usage des combustibles fossiles, agit sur son environnement sont très diverses. On le montrera, dans une première partie de cette note, en passant rapidement en revue les facteurs d'impact aux différentes étapes des filières des combustibles. On centrera ensuite la présentation sur un ensemble d'impacts particulièrement important, celui des émissions dans l'atmosphère, dont on donnera un aperçu général.

Certains risques liés à l'utilisation des énergies fossiles sont connus depuis longtemps, par exemple le risque pour la santé humaine qui, dans le proche voisinage d'installations de combustion, peut résulter de concentrations élevées de dioxyde de soufre et de particules. Ces risques ont fait l'objet dans de nombreux pays de politiques de contrôle qui visaient à éloigner les rejets de la population et à les disperser (cheminées) puis à limiter, pour certains polluants, le débit de rejet de chaque installation. De telles politiques ont atteint leurs objectifs et ont permis de supprimer les "points noirs", ou les pics locaux, de certaines pollutions.

Dans le même temps, les niveaux globaux d'émission d'un grand nombre de polluants et les niveaux moyens de leurs concentrations dans l'environnement, ont continué à croître. Les préoccupations en matière d'environnement ont donc porté de plus en plus, au cours des dernières années, sur les risques des pollutions de fond. C'est ce qu'on illustrera dans une seconde partie de la note où, après un rappel sur l'évolution de la composition de l'atmosphère, on proposera, à titre d'exemples, des éléments d'évaluation de trois types de risques : le risque sanitaire des aérosols, l'impact de l'ozone troposphérique sur l'agriculture, l'effet de serre.

1 Les facteurs d'impact sur l'environnement aux différentes étapes de la filière de production et d'utilisation des combustibles fossiles

En suivant les différentes étapes de la chaîne de production et d'utilisation des combustibles fossiles, on tentera de repérer les principaux facteurs d'impacts sur l'environnement et, en particulier les principales émissions de pollution.

1.1 Extraction des combustibles :

- * les exploitations minières de charbon, qu'elles soient souterraines ou à ciel ouvert, impliquent, par le volume des excavations et celui des remblais de stériles, un bouleversement de leur site (disparition du système antérieur d'occupation du sol, production d'un nouveau paysage, altération de la circulation et de la qualité des eaux...) ;
- * l'extraction de pétrole ou de gaz a aussi un impact géophysique (affaissement des sols...), elle s'accompagne généralement de l'émission dans l'atmosphère de gaz de gisement ainsi que de rejets liquides (eaux extraites du gisement, boues de forage...) ;

1.2 Installations de préparation et d'acheminement des combustibles :

- * la préparation et le transport des combustibles depuis les lieux d'extraction jusqu'aux lieux d'utilisation impliquent un ensemble d'infrastructures lourdes (voies ferrées, ports, routes, conduites, raffineries, stockages...) qui mobilisent des espaces spécifiques, par exemple des espaces littoraux ou des sites de vallées... ;
- * certaines opérations de traitement, telles que le raffinage, s'accompagnent du rejet dans l'environnement de composés organiques gazeux et de liquides (phénols, produits ammoniacaux...) ;
- * le fonctionnement du système d'extraction, de préparation et de transport nécessite une quantité importante d'énergie, donc la combustion d'une partie du combustible ; cette combustion génère, comme on le verra ci-après, des émissions atmosphériques de polluants ;

1.3 Équipements d'utilisation des combustibles :

- * la transformation de l'énergie chimique des combustibles en énergie mécanique (transports, production d'électricité...) implique le rejet dans l'environnement sous forme de chaleur d'une part majeure de l'énergie apportée ; par exemple, une centrale électrique modifie de manière importante la température et par conséquent l'écologie d'un cours d'eau faisant fonction de source froide...
- * les moteurs dissipent une énergie sonore importante (moteurs à explosion des véhicules routiers, réacteurs d'avions...) ; on sait que le bruit est ressenti comme l'une des nuisances graves de la vie quotidienne, notamment en milieu urbain ;

1.4 Existence de "fuites" tout au long des filières d'approvisionnement :

- * des évasions d'hydrocarbures liquides dans l'environnement, dont les accidents de pétroliers ne sont que l'exemple le plus visible, existent en divers points de la filière pétrolière (0,1 % des tonnages transportés par mer ?) ; la couche la plus superficielle des océans est ainsi chargée de quantités importantes d'hydrocarbures légers ; cela constitue une sorte d'empoisonnement de l'interface des échanges océan-atmosphère aux effets mal évalués ;
- * des pertes d'hydrocarbures volatils (0,3% des flux ?) surviennent à toutes les étapes de la filière pétrolière et en particulier lors des stockages ;
- * le gaz naturel est principalement constitué de méthane, gaz à effet de serre (cf. ci-après) ; une part significative du gaz produit (quelques pour

cent) s'évade dans l'atmosphère tout au long de la filière d'approvisionnement ;

- * le "combustible solide" qu'est le charbon, ainsi d'ailleurs que les terrains entourant le charbon dans le gisement, contiennent des "matières volatiles", notamment du méthane ; ce méthane s'évade dans l'atmosphère du fait de l'extraction du charbon ;
- * la manutention et le stockage du charbon s'accompagnent également de pertes de matière ; ainsi des envols de poussières depuis les stocks exposés au vent, ou les véhicules non couverts ; ainsi, du lessivage de tas de charbon exposés à la pluie qui entraîne des minéraux solubles dans les nappes phréatiques ;

1.5 Le rejet final dans l'environnement des produits de combustion :

- * dans la combustion, les combustibles sont pour l'essentiel convertis en produits gazeux rejetés dans l'atmosphère ;
 - les combustibles étant principalement composés de carbone et d'hydrogène, les produits de combustion sont constitués en premier lieu de dioxyde de carbone (CO_2), et de vapeur d'eau ;
 - dans la mesure où les combustibles contiennent du soufre (le charbon et le pétrole brut ont des teneurs en soufre variables, la moyenne des approvisionnements se situant autour de 1% de leur poids en soufre), la combustion produit aussi du dioxyde de soufre (SO_2) ;
 - l'oxygène nécessaire à la combustion est généralement apporté par l'air ; en même temps que la combustion, et suivant les conditions de cette combustion, il y a oxydation d'une partie de l'azote de l'air et production d'oxydes d'azote (NO_x) ; ces oxydes se forment également par oxydation de l'azote organique contenu dans le charbon ou le pétrole ;
 - les produits de combustion rejetés dans l'atmosphère contiennent aussi, en proportions variables, des composés résultant d'une oxydation incomplète du combustible (monoxyde de carbone CO), des imbrûlés (particules de carbone), des hydrocarbures volatils, en particulier des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), et d'autres composés organiques volatils (COV) tels que des aldéhydes, des éléments minéraux inclus dans le combustible brut (arsenic, chrome, cadmium, mercure...) ou des éléments ajoutés (plomb...), etc...
- * la charge minérale du combustible - le charbon contient couramment 10% de cendres - peut être en partie récupérée, avec les imbrûlés solides, par exemple par dépoussiérage des fumées de combustion . Cette charge constitue un déchet solide qui est redéposé dans l'environnement ; sa

lixiviation par les eaux d'infiltration, par exemple, peut représenter un risque ;

- * pour limiter les rejets gazeux d'oxydes de soufre ou d'azote, des traitements des gaz de combustion sont effectués sur certaines installations ; d'autres déchets, notamment des déchets solides, sont alors produits...

La liste des produits rejetés dans l'atmosphère lors de la phase de combustion demande à être affinée suivant les différents combustibles et les différents compartiments des filières énergétiques :

- * pour un même contenu énergétique, le pétrole, et plus encore le charbon, contiennent davantage de carbone que le gaz naturel et produisent donc par combustion davantage de dioxyde de carbone ;
- * le soufre est assez facilement extrait du gaz naturel avant sa distribution, alors que cette extraction n'est pas économiquement envisageable dans le cas du charbon. Pour le pétrole, les traitements classiques de raffinage tendent à répartir entre les différents flux sortants le soufre contenu dans le pétrole brut approvisionné : on fabrique des produits légers peu soufrés (carburants) et des produits lourds très soufrés (fuels). Le dioxyde de soufre est donc émis, pour une part majeure, par les installations consommant charbons et fuels lourds (centrales électriques, raffineries, grandes chaudières pour l'industrie ou le chauffage...) ; pour de telles installations, des solutions techniques peuvent être mises en oeuvre pour extraire des fumées de combustion une grande partie du dioxyde de soufre ;
- * les moteurs et les petites installations de combustion sont moins favorables à une combustion complète des combustibles ; les véhicules de transport sont donc à l'origine de la majeure partie des émissions de monoxyde de carbone et de composés organiques volatils. Cependant, en disposant des catalyseurs appropriés sur le circuit des gaz en sortie du moteur, il est possible de forcer l'oxydation de ces composés et réduire leurs émissions ;
- * les oxydes d'azote sont produits lors de toutes les combustions, avec des taux de production relativement plus élevés dans les moteurs ; des techniques de réduction catalytique permettent de les décomposer.

De cette présentation rapide de différents facteurs d'impact des combustibles fossiles, on retiendra notamment l'importance quantitative des rejets de matière dans l'atmosphère en fin de cycle. C'est l'impact de ces rejets qui sera traité dans la suite de l'exposé.

2 Un aperçu général de l'impact des émissions dans l'atmosphère

Certains impacts de la pollution atmosphérique liée à l'usage des combustibles sont connus depuis longtemps ; par exemple, l'usage du charbon avait déjà été interdit à Londres au XIII^{ème} siècle pour protéger la santé publique. D'autres types de risques ont été perçus plus récemment : c'est de la fin du XIX^{ème} siècle que datent les termes de "pluies acides" et d' "effet de serre" ...

2.1 Les effets chimiques et bio-chimiques des polluants primaires

Le risque pour la santé humaine que peut représenter un air pollué est un sujet de préoccupation ancien. L'homme respire chaque jour 20 m³, c'est à dire 25 kg d'air ; même si un polluant n'est présent dans l'air ambiant que sous de faibles concentrations, les doses absorbées par l'organisme peuvent, lorsqu'elles s'accumulent, devenir importantes. Or il est clair que différents constituants des produits de combustion sont toxiques pour l'homme.

Le dioxyde de soufre et les particules des fumées constituent un complexe dont le risque sanitaire est bien documenté. C'est un risque dont les effets se manifestent actuellement dans diverses régions du monde. En Europe occidentale, des épisodes de pollution sévère étaient régulièrement observés sur des sites comme Londres dans les années 1950 ; l'épisode le plus grave a provoqué des milliers de décès en l'espace de quelques jours. Ces événements catastrophiques ont constitué un élément important de la prise de conscience contemporaine des problèmes de pollution et de l'adoption de politiques de prévention.

De nombreux autres composés chimiques, qu'ils soient émis dans les produits de combustion ou du fait de fuites, peuvent être toxiques pour l'homme. L'oxyde de carbone (accidents de chauffage domestique) ou les oxydes d'azote peuvent provoquer des troubles immédiats. Les effets du plomb, polluant présent dans l'environnement sous de faibles concentrations, se manifestent à long terme. Certains composés organiques, émis à l'état de gaz ou sous forme d'aérosol, sont considérés comme génotoxiques...

Le risque sanitaire croît en raison de la concentration des composés polluants :

- les concentrations de SO₂ sont plus importantes en milieu urbain ou industriel qu'en milieu rural...
- les concentrations de CO sont plus élevées dans les rues à fort trafic et près du sol, à hauteur des rejets de gaz d'échappement : l'occupant d'un véhicule ventilé par une prise d'air située à quelques dizaines de centimètres du sol, l'enfant dans une poussette, sont soumis à une exposition supérieure à celle du citoyen moyen ;

- les concentrations de NO_x sont statistiquement plus élevées dans les logements et dans les pièces comportant des installations de chauffage ou de cuisson à foyer ouvert que dans l'air extérieur.

Le contrôle du risque sanitaire environnemental repose sur la référence à des normes de qualité de l'air, telles que celles définies par l'Organisation Mondiale de la Santé. Ces normes expriment en principe les niveaux de concentrations qui, en l'état actuel des connaissances scientifiques, ne paraissent pas présenter de dangers pour la santé ou bien pour lesquels les risques sont considérés comme faibles eu égard aux coûts d' "évitement". Ces normes sont révisées périodiquement en fonction des enseignements des recherches toxicologiques et épidémiologiques. Dans les pays tels que la France, où des politiques de prévention sont mises en oeuvre et où un suivi en temps réel des niveaux de pollution est opéré dans les zones critiques, les valeurs limites préconisées pour les polluants classiques sont généralement respectées.

Outre les effets sanitaires, d'autres effets chimiques ou bio-chimiques des polluants primaires ont été observés depuis longtemps, tels que les dommages subis par les végétaux et les processus de dégradation des matériaux.

L'exposition au dioxyde de soufre a été par exemple, dans le passé, la cause de dommages forestiers en France, dans des sites comme la Basse Vallée de la Seine. Il semble toutefois que les niveaux de concentration en SO_2 auxquels on est redescendu actuellement, sur la base des critères de santé publique, sont assez bas pour prévenir les atteintes directes graves à la végétation.

L'action de polluants comme le SO_2 sur certains matériaux (pierres, métaux...) est un phénomène bien étudié, auquel la dégradation accélérée de nombreux monuments au cours des dernières décennies a sensibilisé le public. Le fait que, sur des sites comme Londres cette dégradation ne se soit pas ralentie parallèlement à la baisse des concentrations de SO_2 conduit à prêter également attention au rôle possible des NO_x dans ces processus.

2.2 *La prise de conscience récente d'effets indirects ou plus cachés*

On a pris progressivement conscience du fait que les effets chimiques ou bio-chimiques cités ci-dessus ne sont que le premier maillon visible d'une longue chaîne d'impacts.

Pour avoir un aperçu de ces impacts, il faut suivre l'ensemble des éléments chimiques rejetés dans l'atmosphère, qu'il s'agisse de produits de combustion ou de produits volatils émis du fait de pertes, et examiner ce qu'ils deviennent.

Le devenir des produits de combustion dans l'atmosphère

Certains composés rejetés sont stables ; ils restent très longtemps dans l'atmosphère où ils s'accumulent . Ainsi, une molécule de dioxyde de carbone

CO₂ rejetée dans l'atmosphère y séjourne en moyenne 120 ans - l'estimation est affectée d'une assez large fourchette d'incertitude - avant de disparaître dans un "puits", tel que par exemple la dissolution dans les eaux océaniques. Une molécule de méthane CH₄ reste en moyenne 10 ans dans l'atmosphère avant d'être éliminée par oxydation. L'accumulation de ces composés peut modifier de manière sensible la composition de l'atmosphère et ses caractéristiques. Une illustration en est offerte par le problème du renforcement de l'effet de serre (cf. ci-après).

D'autres composés émis au cours des cycles énergétiques "disparaissent" plus rapidement. Ils réagissent entre eux et avec les autres constituants de l'atmosphère, qu'il s'agisse de constituants d'origine naturelle ou d'autres polluants d'origine anthropique. Ces réactions dépendent de nombreux paramètres : concentrations relatives des différents composés, température, intensité du rayonnement solaire, etc... Dans une certaine mesure, toute émission d'un composé réactif déplace l'équilibre chimique entre les nombreux constituants de l'atmosphère. Ainsi, l'augmentation des concentrations d'ozone (O₃) que l'on observe actuellement dans la troposphère est un effet indirect de l'émission de polluants d'origine énergétique (cf. ci-après).

Les atomes de soufre ou d'azote oxydé rejetés dans les produits de combustion ne restent en suspension dans l'atmosphère sous forme primaire (SO₂, NO, NO₂) ou sous forme secondaire (après oxydation en sulfates, acide nitrique, nitrates...) que pour une durée moyenne de quelques jours. Ils retombent progressivement au sol (absorption des gaz, dépôt à sec des particules, dissolution dans les eaux de pluie), avec des distances moyennes de transport qui sont de l'ordre du millier de kilomètres à partir du lieu d'émission.

Le transfert des polluants dans d'autres milieux

Transférés d'un milieu à un autre par dépôt, les composés soufrés et azotés tendent à nouveau à déplacer l'équilibre chimique du milieu qui les reçoit. La charge de ces dépôts, accumulée au long des années, peut modifier les caractéristiques de ce milieu jusqu'à un point incompatible avec la pérennité de l'écosystème qu'il porte.

Dans un lac, les apports acides directs ou indirects peuvent abaisser le pH et faire disparaître, par niveaux successifs, la vie aquatique.

De même les apports atmosphériques peuvent bouleverser l'équilibre biogéochimique de certains sols forestiers : les plantes ont besoin pour leur croissance de cations alcalins qu'elles trouvent dans les sols (calcium, magnésium, potassium) ; ces cations sont fournis par la décomposition du substrat rocheux ; en cas d'apport atmosphérique acide, ces mêmes cations sont mobilisés par la réaction de neutralisation et drainés en profondeur par la circulation des eaux ; au delà d'un certain niveau annuel d'apport ("charge critique"), le pH du sol peut baisser ; cette baisse du pH peut également

s'accompagner d'une augmentation relative de la concentration dans le sol d'aluminium soluble, qui est un élément toxique pour la végétation.

Ainsi, dans toute la partie centrale du continent européen, une proportion notable des écosystèmes naturels serait mise en danger si le rythme des dépôts de soufre et d'azote se maintenait à son niveau actuel.

Outre l'effet d'acidification, les retombées d'azote constituent pour la biomasse un apport de nutriment qui peut également mettre en cause l'équilibre des écosystèmes naturels : un exemple d'un tel effet d' "eutrophisation" peut être la prolifération de certains micro-organismes en milieu aquatique et la désoxygénation du milieu qui en résulte.

Les retombées d'autres polluants transportés par l'atmosphère illustrent également le mécanisme de diffusion de la pollution dans l'environnement : ainsi des retombées d'hydrocarbures imbrûlés, dont on estime qu'elles contribuent à la pollution des océans à un niveau comparable à celui des rejets directs d'hydrocarbures liquides en mer, ainsi de la dispersion d'éléments traces et de polluants organiques à longue durée de vie...

En définitive, la chaîne des effets touche tous les compartiments de l'environnement : après avoir modifié les caractéristiques des horizons superficiels, les retombées acides peuvent induire une pollution des nappes phréatiques ; après être retombés au sol, les éléments traces tels que le plomb peuvent être transportés par les chaînes alimentaires (fourrage, lait), etc...

3 L'évolution de la composition de l'atmosphère terrestre

Avant de présenter des éléments d'évaluation d'impacts tels que l'effet de serre, on donnera ci-après quelques indications quantitatives sur l'évolution de la composition de l'atmosphère, en relation avec l'utilisation des combustibles fossiles. Certaines de ces estimations sont affectées d'une marge d'incertitude assez large (cf. Tableau 1).

3.1 Dioxyde de carbone

La consommation mondiale de combustibles fossiles a entraîné en 1990 le rejet dans l'atmosphère d'environ 22 milliards de tonnes de dioxyde de carbone CO₂. Le niveau de rejet était de 14,6 milliards de tonnes en 1970 ; il a ainsi augmenté de 50% en 20 ans.

Le déstockage de carbone de la biomasse, qui résulte de la déforestation en zone intertropicale ainsi que d'autres évolutions dans l'utilisation des sols, s'est traduit au cours de la décennie 80 par une injection supplémentaire de CO₂ dans l'atmosphère de l'ordre de 6 milliards de tonnes par an.

COMPOSÉS	Dioxyde de carbone CO ₂	Monoxyde de carbone CO	Dioxyde de soufre SO ₂	Oxydes d'azote NO _x	Méthane CH ₄	Composés Organiques Volatils COV	aérosols organiques et minéraux	Ozone O ₃
Part des combustibles fossiles dans le total des émissions anthropiques	80%	45% (a)	90%	75%	25%	40%		
Émissions liées aux combustibles fossiles (Millions de Tonnes/an, Monde)	22 000	500 (b)	160	80 (c)	100	45	(production secondaire)	
Durées de vie dans l'atmosphère	120 ans	2 mois	de quelques heures à quelques jours		10 ans	de quelques heures à quelques semaines	quelques jours ou semaines	2 mois aux latitudes moyennes
Concentrations (microg/m ³ , plage des moyennes annuelles observées dans les stations de mesure françaises)	707 000	de 1 000 à 10 000 (d)	de 5 à 90	de 40 à 1 000 (c)	1 230	1 100 à 2 800	de 5 à 70	de 10 à 70
Taux de croissance des concentrations	0,5%/an	de l'ordre de 1%/an (concentrations de fond dans l'hémisphère Nord)						supérieur à 1,5%/an dans l'hémisphère Nord

Tableau 1 : Rejets et concentrations dans l'atmosphère des principaux composés chimiques associés à l'utilisation des combustibles fossiles

(Ces évaluations ne sont que l'illustration d'ordres de grandeur ; certains coefficients d'incertitude sont importants.)

Sources : Académie des Sciences, IPCC, ADEME 1991 et divers

Remarques :

(a) En complément des combustibles fossiles, les brûlages de biomasse (feux agricoles) constituent une source importante d'émissions de CO, NO_x, COV.

(b) Une production secondaire dans l'atmosphère d'environ 110 millions de tonnes de CO résulte en outre de l'oxydation des COV et CH₄ liés aux combustibles fossiles.

(c) Cette quantité est évaluée en équivalent NO₂

(d) La concentration de fond dans la troposphère est de 150 microg/m³ dans l'hémisphère Nord et de 80 microg/m³ dans l'hémisphère Sud.

Le flux d'origine anthropique, somme des deux composantes précédentes, est faible au regard des flux naturels de circulation du carbone entre la biosphère continentale, l'atmosphère et l'océan. Il est cependant suffisamment important pour en modifier l'équilibre.

Le rejet anthropique de CO₂ dans l'atmosphère représente, à son niveau actuel, une injection annuelle équivalant à 1% du contenu en CO₂ de l'atmosphère. Il apparaît, très schématiquement, que ce flux supplémentaire de CO₂ n'est compensé que pour moitié environ par un accroissement du flux de CO₂ allant de l'atmosphère vers l'océan et, peut-être, vers la biomasse continentale. Le résultat est une augmentation des concentrations en CO₂ de l'atmosphère, augmentation dont le taux actuel est proche de 0,5 % par an.

Ainsi observe-t-on que la concentration en CO₂ de l'atmosphère, qui au cours du dernier millénaire préindustriel était établie autour de 280 ppm (partie par million en volume), a augmenté à partir des années 1800 suivant une progression d'allure exponentielle. Le niveau actuel est de 353 ppm ; l'accroissement annuel de 1,8 ppm.

3.2 Méthane

On a estimé que les émissions de méthane d'origine anthropique représentaient chaque année une injection dans l'atmosphère d'environ 350 millions de tonnes de CH₄. La part provenant du secteur énergétique, c'est à dire de carbone fossile, peut être évaluée à partir de la teneur en carbone 14 du méthane atmosphérique ; elle pourrait représenter 100 millions de tonnes, soit le quart du total. La concentration de méthane dans l'atmosphère, qui était de 0,8 ppm à l'ère pré-industrielle a plus que doublé et s'élève actuellement à 1,72 ppm.

Le taux d'augmentation de la concentration de méthane présente au demeurant des variations mal élucidées : de 1,3 %/an vers 1980, il aurait ralenti à 0,6 %/an en 1990. Ceci illustre les limites de la connaissance que l'on a actuellement de ces phénomènes puisqu'on ne sait pas si cette diminution est due à un abaissement du niveau des rejets ou bien à un raccourcissement de la durée de vie du méthane dans l'atmosphère. Cette deuxième hypothèse pourrait elle-même être liée à une augmentation des concentrations dans l'atmosphère du radical hydroxyle OH. La concentration de ce radical, le principal oxydant de l'atmosphère, ne peut pas être évaluée par mesure directe ; elle est susceptible d'avoir augmenté du fait de l'accroissement des émissions de NO_x...

3.3 Dioxyde de soufre

Les rejets de dioxyde de soufre dans l'atmosphère par suite de l'utilisation des combustibles fossiles représentent au niveau mondial de l'ordre de 70 à 80 millions de tonnes par an de SO₂. Ils constituent la source principale d'injection de soufre dans l'atmosphère. Étant donnée la durée de vie

relativement courte du dioxyde de soufre, sa concentration dans l'atmosphère varie dans l'espace et dans le temps en relation étroite avec les niveaux d'émission.

En Europe, des politiques de réduction des émissions de SO₂ ont été mises en oeuvre (désulfuration des fumées des grandes installations de combustion, utilisation de fuels à basse teneur en soufre dans les foyers domestiques...). De ce fait les émissions des pays de l'Union Européenne après avoir connu un maximum de l'ordre de 21 millions de tonnes/an au cours de la décade 1970 - 1980 étaient redescendues à 11,6 millions de tonnes en 1990. Les concentrations de SO₂ dans l'atmosphère et les retombées acides ont connues une évolution parallèle.

3.4 Oxydes d'azote

Les rejets d'oxydes d'azote liés aux combustions s'élèvent au niveau mondial à environ 80 millions de tonnes (NO₂). Ils constituent l'essentiel des émissions d'oxyde d'azote d'origine anthropique. On considère que ces émissions ont été multipliées par un facteur 7 depuis le début du siècle dans les pays industrialisés, ce qui correspond à un taux de croissance moyen de 2,5%/an.

Comme pour le soufre, la distribution spatio-temporelle des concentrations d'oxydes d'azote est liée au profil des émissions.

Les émissions des pays de l'Union Européenne, qui étaient de 8,9 millions de tonnes en 1970, se sont accrues jusqu'à 11,1 millions en 1980 (+ 25%) et ont été maintenues à un niveau quasi stationnaire dans la décennie suivante (11,6 millions de tonnes en 1990).

En Europe, une part désormais majoritaire des émissions d'oxydes d'azote provient du fonctionnement des moteurs des véhicules de transport. La production de NO_x par les transports aériens, si elle ne représente qu'une part faible du total, est en croissance rapide et pourrait avoir une importance particulière du fait qu'elle est rejetée directement dans une couche élevée de l'atmosphère.

3.5 Composés organiques volatils

Les émissions de COV liées aux cycles des combustibles sont, au niveau mondial, de l'ordre de 40 millions de tonnes/an. Ces émissions représentent environ la moitié des sources anthropiques de COV, qui comprennent notamment les émissions liées aux solvants organiques et celles des brûlages agricoles ou forestiers.

L'appellation de COV recouvre en fait un grand nombre de composés dont chacun a des caractéristiques propres (réactivité chimique, toxicité...). Les durées de vie dans l'atmosphère s'échelonnent, suivant les composés, de quelques heures à quelques mois. Leur distribution spatiale dépend donc de

leur nature et des zones d'émission. On estime que le taux d'augmentation moyen actuel des concentrations d'hydrocarbures volatils dans l'hémisphère nord est de l'ordre de 0,8 à 1 %/an.

3.6 *Monoxyde de carbone*

Les émissions mondiales de monoxyde de carbone liées à l'utilisation des combustibles fossiles seraient de l'ordre de grandeur de 500 millions de tonnes/an. Une autre source anthropique d'importance comparable est constituée par les brûlages agricoles.

En fait, le monoxyde de carbone présent dans l'atmosphère du fait de l'activité humaine provient non seulement de ces émissions directes, mais aussi de l'oxydation dans l'atmosphère du méthane et des COV d'origine anthropique. Ce flux secondaire est du même ordre de grandeur que les flux primaires cités ci-dessus.

La durée de vie du monoxyde de carbone dans l'atmosphère est de l'ordre de 2 mois. Les concentrations sont plus élevées dans l'hémisphère nord, région principale de production. Elles s'accroissent dans cet hémisphère à un rythme de l'ordre de 1 %/an.

3.7 *Aérosol*

Les émissions liées aux cycles des combustibles contribuent à la formation de l'aérosol atmosphérique à la fois directement (émissions de suies et de cendres volantes) et indirectement (particules de sulfates formées par oxydation de SO₂, nitrates provenant des NO_x, composés carbonés dérivés de COV). Cet aérosol est un milieu très complexe et encore mal connu ; des particules minérales peuvent adsorber des hydrocarbures; des aérosols liquides peuvent dissoudre des composés gazeux...

Il semble qu'on prenne mieux conscience actuellement de l'importance de l'aérosol atmosphérique dans divers phénomènes. On a évoqué précédemment son impact sanitaire ; l'aérosol a également un effet optique : les particules de sulfates diffusent le rayonnement solaire, les particules carbonées l'absorbent. Il a un impact sur les processus de formation des nuages en constituant des noyaux de condensation pour la formation des gouttelettes. Il influe sur les équilibres chimiques de l'atmosphère, comme une sorte d'agent de catalyse hétérogène, en fournissant des surfaces de mise en contact entre espèces chimiques...

On estime que, au dessus des zones industrielles de l'Est de l'Europe ou de l'Est de l'Amérique du Nord, les concentrations atmosphériques de sulfates sont actuellement 10 à 15 fois plus élevées que les niveaux naturels.

L'augmentation de la pollution de fond, loin des lieux d'émission est indiquée par l'évolution des dépôts de nitrates dans les glaces polaires : ces dépôts ont

été multipliés par trois depuis le début du siècle, soit un accroissement moyen de 1,1 % /an.

3.8 Ozone troposphérique

L'ozone (O_3) est un constituant présent en faible concentration dans l'atmosphère "naturelle". On sait que la majeure partie de cet ozone atmosphérique (environ 90%) se trouve dans la stratosphère et qu'une baisse préoccupante des concentrations y est observée, en particulier aux latitudes élevées. Cette baisse est attribuée à des réactions de destruction de l'ozone par des composés halogénés tels que les CFC.

L'ozone de la troposphère (partie inférieure de l'atmosphère jusqu'à une altitude de l'ordre de 10 km), s'il ne représente qu'environ 10% du total de l'ozone atmosphérique, et s'il n'est présent qu'en concentrations de quelques dizaines de ppb (parties par milliards), est cependant un composé important à la fois par son activité chimique et ses propriétés radiatives.

La comparaison des concentrations mesurées à la fin du siècle dernier, par exemple à l'Observatoire du Parc Montsouris à Paris, et des niveaux actuels montre que le niveau de fond de l'ozone troposphérique dans des régions comme l'Europe est passé d'environ 10 ou 15 ppb à 40-60 ppb. Il a donc été approximativement multiplié par 4 en un siècle, soit un taux de croissance moyen de 1,5%/an ; au cours des deux dernières décennies, ce taux s'est même élevé à 2,4 %/an.

La production d'ozone est le résultat de réactions photochimiques complexes au sein de l'atmosphère. Dans ces réactions, la plupart des composés cités précédemment au titre des émissions des cycles énergétiques jouent un rôle.

Le processus de fond, celui qui est quantitativement le plus important à l'échelle globale, peut être schématisé en disant que l'ozone est produit lors de l'oxydation photochimique de monoxyde de carbone ou de méthane en présence d'oxydes d'azote.

A ce processus de fond peuvent se superposer des processus de production d'ozone plus locaux et plus limités dans le temps. Ils résultent de l'oxydation photochimique de composés organiques volatils en présence d'oxydes d'azote. Certains de ces COV sont beaucoup plus réactifs que le méthane ou le monoxyde d'azote ; ils peuvent être à l'origine de pointes de pollution par l'ozone dans des régions à fortes émissions de COV et conditions météorologiques favorables (température, ensoleillement, vent faible...), telles que, par exemple en France, la région de Fos-sur-Mer.

4 Risque sanitaire de l'aérosol atmosphérique

Certains des produits présents dans l'atmosphère, et dont l'origine est liée à l'utilisation des combustibles fossiles, représentent un danger pour la santé humaine. Tel est le cas de la pollution particulaire, et plus particulièrement des particules fines.

4.1 Identification du risque

La pollution particulaire perturbe en premier lieu le fonctionnement du système respiratoire. Lors d'une inspiration d'air pollué, les particules les plus grosses sont retenues au niveau du nez et des voies aériennes supérieures, mais les particules de taille inférieure à 10 μm (dites PM_{10}) pénètrent dans les voies respiratoires.

Une partie de ces particules se dépose au niveau de l'arbre trachéo-bronchique et est normalement éliminée par la clairance mucociliaire dans un délai de l'ordre de la journée. Stimulant les récepteurs nerveux des voies respiratoires, la présence de particules peut provoquer des réactions de toux et de bronchoconstriction qui accélèrent l'élimination de ces particules et du mucus des bronches. Dans certains états morbides (infection virale, asthme), cette réaction normale de défense peut être exagérée et s'accompagner de l'hypersécrétion d'un mucus plus visqueux qui contrarie le mécanisme d'élimination.

Les particules les plus fines (taille inférieure à 2,5 μm) pénètrent profondément au niveau des voies aériennes terminales et des alvéoles où elles se déposent ; elles sont phagocytées par des cellules macrophages qui sont elles-mêmes éliminées par le système lymphatique ; le processus d'élimination prend des semaines, voire des mois. Cette fonction épuratoire des macrophages peut se dégrader si elle est trop sollicitée par la pollution particulaire, perturbant du même coup la réponse immunitaire à d'autres agressions.

Certaines populations sont particulièrement sensibles à l'effet des poussières atmosphériques. C'est le cas des enfants, et surtout des jeunes enfants, pour des raisons morphologiques et physiologiques. Les asthmatiques, les bronchitiques constituent d'autres populations fragiles.

Il peut exister des effets de synergie entre les particules et d'autres polluants agressant les voies respiratoires, et également associés à l'usage des combustibles fossiles, par exemple le dioxyde de soufre ou l'ozone. Par ailleurs, outre l'effet "mécanique" décrit ci-dessus, les particules peuvent avoir un effet chimique, soit du fait de la nature de leur composant principal, soit parce qu'elles peuvent transporter, absorbés à leur surface ou dissous, des composés toxiques, notamment organiques.

Les particules introduites dans l'atmosphère du fait de l'emploi des combustibles fossiles, qu'elles soient émises directement lors de la combustion (cendres volantes non interceptées par les équipements de dépoussiérage, suies des moteurs à explosion) ou qu'elles soient produites ultérieurement (particules de sulfates formées par oxydation de SO₂, nitrates provenant des NO_x, composés carbonés dérivés de COV) se situent principalement dans la fraction fine de l'aérosol atmosphérique (< 2,5 µm). Les particules naturelles d'origine terrigène, les poussières provenant des chaussées, ont au contraire une taille généralement supérieure à 2,5 µm. Les énergies fossiles contribuent donc au premier chef au risque sanitaire particulaire.

4.2 *Quantification de la relation entre concentration particulaire et santé*

Il a été dit précédemment que l'on connaissait bien le risque qu'il y avait pour l'homme à respirer un air chargé de particules. En fait la mesure de ce risque a longtemps reposé sur l'observation de situations de forte pollution, c'est à dire de niveaux élevés de concentration particulaire.

Des recherches épidémiologiques récentes ont apporté sur ces questions un éclairage nouveau. Elles ont permis de constater qu'il existait un risque sanitaire lié aux particules, même à de faibles niveaux de concentration, et de quantifier ce risque.

De nombreux travaux ont été réalisés depuis une vingtaine d'années pour rechercher s'il existait une corrélation entre variations journalières de la pollution sur un site et variations de la morbidité ou de la mortalité (études diachroniques). Le bilan de ces recherches a été tiré en France dans le cadre du programme ERPURS (Évaluation des Risques de la Pollution Urbaine sur la Santé) ainsi que par le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique.

Un ensemble d'études relatives à la mortalité a notamment été réalisé aux États Unis, portant sur des populations de plus en plus importantes (suivi de la mortalité journalière de 10 millions d'habitants pendant 10 ans...), sous des climats et des types de pollution différents, avec des méthodologies statistiques de plus en plus rigoureuses pour bien distinguer les effets des différents facteurs susceptibles d'influer sur la mortalité. Les générations successives d'études confirment les résultats des premières analyses et l'existence d'une relation statistique à court terme entre la pollution particulaire et le taux journalier de mortalité d'une population. La forme de la relation concentration particulaire/mortalité est approximativement linéaire : en moyenne, la mortalité journalière relative augmente de 1,2% chaque fois que la concentration de l'air en particules (PM₁₀) augmente de 10 µg/m³.

On n'a pas pu mettre en évidence, dans la plage des niveaux de pollution soumis à l'analyse, de seuil en dessous duquel une variation du niveau de pollution n'aurait plus d'effet. On est donc conduit à considérer qu'il n'est pas possible, en l'état actuel des connaissances, de déterminer un niveau de

pollution particulaire sans risque pour la santé, en particulier pour les enfants et les sujets les plus fragiles de la population.

Considérant le niveau moyen de pollution particulaire auquel est soumis la population des États Unis, les experts américains estiment ainsi que chaque année 50 000 à 60 000 décès peuvent être associés à cette pollution particulaire.

La maladie étant un évènement beaucoup plus fréquent que le décès, l'étude de la relation entre pollution et morbidité requiert le suivi d'une population d'échelle plus modeste que celle citée précédemment. Des études ont été menées dans différents pays, dont la France, qui concluent, comme en matière de mortalité, à l'existence d'une relation entre pollution particulaire et morbidité (toux, épisodes asthmatiques, réduction des performances respiratoires) ; cette relation est quasiment linéaire et s'observe jusqu'à des niveaux de pollution particulaire considérés comme bas.

Il faut souligner que ces études épidémiologiques ne permettent d'appréhender que les risques à court terme. On ne sait pas mesurer les implications que peut avoir à long terme la répétition d'épisodes modérés d'irritation bronchique ; on ne sait pas mesurer les effets de l'absorption continue, par le vecteur particulaire, de composés organiques mutagènes.

4.3 La contribution des énergies fossiles au risque sanitaire particulaire

Considérons une grande installation industrielle de combustion. Chaque tonne de combustible utilisée implique l'émission dans l'atmosphère d'une certaine quantité de particules, de SO₂, de NO_x.

Cette source génère dans l'espace qui l'entoure un champ de pollution particulaire qui résulte de la diffusion des particules directement émises par la source, mais également de la formation secondaire de sulfates et de nitrates à partir du SO₂ et des NO_x. L'espace concerné par cette pollution est vaste. Pour que 80 % du soufre émis se soit déposé, il faut s'éloigner en moyenne de 1000 km de la source ; pour l'azote, la distance équivalente est de 2000 km.

La géographie du transport de pollution dépend évidemment de la situation réelle considérée. En donner une image fidèle requiert des modèles complexes et de mise en oeuvre lourde. Nous considérerons simplement ici un cas d'école, constitué par une source située au centre d'une aire de forme circulaire de 550 000 km², émettant dans un milieu atmosphérique isotrope. A l'aide d'un modèle de transport atmosphérique simplifié, on peut calculer les concentrations moyennes de particules primaires, de sulfates, de nitrates qui sont induites dans cet espace par des débits continus d'émission de 1 tonne/an de particules ou de SO₂ ou de NO_x (cf. bibliographie) :

particules primaires	:	3.8×10^{-6}	µg /m ³ par tonne émise/an
sulfates	:	0.6×10^{-6}	µg /m ³ par tonne SO ₂ /an
nitrates	:	1×10^{-6}	µg /m ³ par tonne NO ₂ /an

Ces accroissements de la pollution particulaire ont, si on se réfère aux études épidémiologiques citées précédemment, une implication en termes de mortalité et de morbidité de la population de la zone. Si on suppose, par exemple, que vit dans l'espace considéré une population de 55 millions d'habitants, présentant un taux de mortalité moyen de 1%/an, le risque sanitaire lié aux émissions est, en termes de mortalité :

R létalité particules	:	$2,5 \cdot 10^{-3}$ décès attribué par tonne de part. émise
R létalité sulfate	:	$0,4 \cdot 10^{-3}$ décès attribué par tonne SO ₂ émise
R létalité nitrate	:	$0,7 \cdot 10^{-3}$ décès attribué par tonne NO _x émise

En attribuant à ces "décès statistiques" une valeur monétaire, égale par exemple à celle adoptée en matière de rationalisation des choix de sécurité routière, soit 3,3 millions de FF par décès, on peut associer à chaque émission un coût de létalité :

C létalité particules	:	8 000 FF / tonne de particules
C létalité sulfate	:	1 200 FF / tonne SO ₂
C létalité nitrate	:	2 300 FF / tonne NO _x

Par une démarche semblable, on peut associer des coûts de morbidité aux émissions de particules, de SO₂ et de NO_x, en s'appuyant sur les résultats d'études épidémiologiques sur la relation entre, d'une part, les concentrations particulières dans l'air ambiant, d'autre part, la fréquence de divers troubles respiratoires plus ou moins invalidants observée sur une population.

En considérant les facteurs de risque et les coûts unitaires de morbidité qui ressortent d'études européennes et américaines actuelles, les coûts de morbidité apparaissent très sensiblement supérieurs aux coûts de mortalité cités ci-dessus. Au total, dans le cas de figure étudié, on serait conduit à des coûts sanitaires de la pollution particulaire tels que :

C sanitaire particules	:	40 000 FF / tonne de particules
C sanitaire sulfate	:	6 000 FF / tonne SO ₂
C sanitaire nitrate	:	12 000 FF / tonne NO _x

Ces valeurs numériques sont le résultat d'un ensemble d'hypothèses appliquées dans un cas d'école particulier ; elles nous paraissent cependant donner une idée d'un ordre de grandeur potentiel de ce type d'impact.

Le processus de calcul précédent illustre au demeurant une démarche générale de quantification de l'impact sanitaire d'émissions polluantes. Cette démarche pourrait être appliquée de manière similaire aux risques sanitaires d'autres polluants d'origine énergétique tels que le dioxyde de soufre, sous sa forme primaire de gaz, ou bien l'ozone.

5 L'impact de l'ozone troposphérique sur l'agriculture

On avait observé dès les années 50 en Californie que des épisodes de fortes concentrations d'ozone pouvaient faire subir des dommages importants aux cultures.

Avec la croissance continue des niveaux de pollution de fond, on constate aujourd'hui que la majeure partie des régions rurales européennes est soumise à des concentrations moyennes d'ozone qui sont nuisibles pour de nombreuses cultures et pour les écosystèmes naturels ou forestiers.

5.1 Identification du risque

L'absorption d'ozone par les plantes résulte du processus normal d'échange gazeux entre les plantes et l'atmosphère. Lorsque l'on expose une plante pendant quelques heures à un certain niveau de concentration d'ozone, des symptômes visibles apparaissent, tels que de petites taches nécrotiques sur la face supérieure des feuilles. L'ozone a pénétré dans la feuille par les stomates, a été transporté dans les espaces intercellulaires et a atteint le parenchyme chlorophyllien de la face supérieure des feuilles, détruisant partiellement des groupes de cellules.

Mais, au delà des symptômes visibles, l'ozone altère en profondeur les processus physiologiques de la plante. A partir de niveaux de concentration relativement faibles, il réduit l'activité de photosynthèse et augmente la perméabilité membranaire ainsi que l'activité respiratoire des parties aériennes. Il en résulte une rupture de l'équilibre métabolique de la plante, qui peut se traduire par une diminution de la productivité des cultures agricoles, une modification d'aspect, une moindre résistance aux parasites ou aux stress climatiques (sécheresse, gelée...).

La sensibilité des plantes à l'ozone dépend des espèces végétales et, pour une même espèce, des différentes variétés ou cultivars. Parmi les espèces considérées comme sensibles figurent notamment des céréales (blé, orge, seigle, avoine, riz), des fourrages (trèfle), des légumes (pomme de terre, haricot, radis, tomate, épinard...), la vigne, le tabac, des arbres fruitiers (oranger, citronnier ...). Certaines espèces sont moyennement sensibles (choux, endive, pois..) ; d'autres sont peu sensibles (betterave, fraisier, laitue, abricotier, pêcher, poirier...). Les arbres forestiers peuvent être répartis de la même façon en plusieurs classes de sensibilité.

5.2 Quantification de la relation entre pollution par l'ozone et rendement

L'étude quantitative de la relation entre exposition d'une culture à l'ozone et gravité de l'impact est difficile car cette relation dépend du stade de développement de la plante et d'un ensemble complexe de facteurs d'environnement (vent, lumière, température, humidité, exposition à d'autres polluants, apport hydrique et minéral...).

Le type d'impact qui a fait l'objet du plus grand nombre d'études est l'impact sur la productivité des plantes. Cet impact est étudié en procédant à des expérimentations sur des cultures témoins dans des chambres à ciel ouvert exposées à une concentration contrôlée d'ozone. Un vaste programme d'études a été conduit aux États-Unis dans le cadre du NCLAN (National Crop Loss Assessment Program). Un programme européen ICP-Crops (International Cooperative Programme for investigating the effects of air pollutants and other stresses on agricultural crops) est en cours, auquel la France participe (recherches sur le site de Montardon).

L'un des résultats du programme européen est la proposition d'un nouvel indicateur d'exposition des végétaux à l'ozone. On avait beaucoup discuté pour savoir quel paramètre était le plus important pour expliquer les variations de rendement observées : la concentration moyenne d'exposition à l'ozone ou bien l'exposition à des pointes de pollution. Il est désormais proposé de prendre en compte un indice dit AOT40 (accumulated exposure over a threshold of 40 ppb).

Cet indice est la somme des concentrations horaires d'ozone, comptées à partir d'un seuil de 40 ppb (parties par milliards), pendant les heures de jour (rayonnement solaire supérieur à 50 W/m²) et durant la saison de croissance des végétaux (mai à juillet en général). L'unité dans laquelle est exprimé l'indice est le ppb. heure.

Dans le cadre du programme européen, on a particulièrement étudié jusqu'à présent les effets de l'ozone sur les rendements de blé. Le blé, cultivé dans de nombreux pays, est assez représentatif de la sensibilité à l'ozone d'un ensemble d'autres cultures.

Une "fonction dose-réponse" de référence a été obtenue en analysant les expérimentations réalisées dans quatre pays au cours de cinq années sur des cultures de blé de printemps (*Triticum aestivum*) de quatre variétés différentes. Le rendement en blé diminue proportionnellement à l'exposition à l'ozone ; toute augmentation de l'indice AOT40 de 2600 ppb-h se traduit par une diminution du rendement de 5%.

Les expérimentations sur le trèfle montrent un "facteur de réponse" assez proche ; celles sur le haricot font apparaître une sensibilité plus élevée des rendements à la pollution par l'ozone.

5.3 *Évaluation des dommages*

Évaluer la signification de ces résultats en termes de dommages agricoles suppose en premier lieu que l'on connaisse l'exposition actuelle des cultures à l'ozone.

Cette condition liminaire est en elle-même un problème. Les concentrations d'ozone présentent en effet des variations importantes dans le temps et dans l'espace en fonction des cycles photochimiques journaliers, des conditions climatiques, des concentrations de polluants précurseurs. Il n'existe en France qu'un petit nombre de stations de mesure et elles ne fournissent qu'une idée approximative de l'exposition du territoire. Sur la base de leurs relevés, et à partir des travaux de modélisation menés au niveau européen, il semble que l'on puisse dire que les concentrations moyennes d'ozone durant les heures de jour de la saison de végétation sont de l'ordre de 40 ppb dans les zones rurales françaises.

D'après des correspondances établies dans le contexte anglais, les niveaux de l'indice AOT40 associés à de telles concentrations sont d'environ 10 000 ppb-h.

Si l'on extrapolait aux cultures de plein champ la fonction dose-réponse observée dans les expérimentations en chambre à ciel ouvert, cela signifierait donc que les rendements actuels de blé, de trèfle et de nombreuses autres cultures sont inférieurs d'environ 20% à ce qu'ils seraient en l'absence de pollution par l'ozone.

Une telle transposition pose évidemment question. On peut notamment se demander si, sans d'ailleurs que la démarche ait été consciente, il n'y a pas eu sélection, pour chaque culture, de variétés résistant mieux à l'ozone.

Supposons, par exemple, que la moyenne des cultures françaises soit affectée d'une baisse de rendement de 10%. La production végétale de l'agriculture française (hors auto-consommation pour la production animale) s'étant élevée en 1992 à 158 milliards de francs, la pollution par l'ozone représenterait un manque à gagner de 16 milliards de francs.

5.4 Contribution des pollutions liées aux combustibles fossiles

On peut tenter de rapporter ces pertes de récoltes aux différentes émissions de polluants précurseurs de l'ozone (NO_x, COV, CH₄, CO).

Les relations entre les niveaux d'émissions de ces précurseurs et les concentrations d'ozone sont en fait fort complexes. La concentration d'ozone dans l'air ambiant résulte de la superposition de différentes échelles de phénomènes :

- la concentration d'ozone de fond, celle de la troposphère libre, est liée à l'oxydation de CH₄ et de CO, les oxydes d'azote agissant comme des catalyseurs ; étant donné le niveau élevé des concentrations actuelles de CH₄ et de CO, ce sont les concentrations, donc les émissions, de NO_x qui limitent la formation d'ozone ; l'échelle géographique à laquelle s'observent les variations de concentration d'ozone est large ;

- la formation d'ozone dans la couche de mélange - la couche basse de la troposphère - est liée à l'oxydation de COV en présence d'oxydes d'azote ; beaucoup de COV réagissent dans une échelle de temps courte (quelques heures à quelques jours) et l'échelle géographique des équilibres est donc "régionale" ; dans les régions où les concentrations d'oxydes d'azote sont basses, ce sont elles qui limitent la production d'ozone ; mais lorsque les concentrations de NO_x dépassent un certain seuil, ce sont les émissions de COV qui constituent le facteur directeur de la formation d'ozone

Ainsi, le niveau de l'exposition à l'ozone d'un espace rural en France pourra être la somme de, par exemple, trois composantes : la pollution provenant d'une zone urbaine proche, celle résultant de la circulation des masses d'air pollué à l'échelle de l'Europe, celle de la troposphère libre.

Suivant les situations, il sera plus ou moins efficace de réduire les émissions de COV pour abaisser les concentrations d'ozone. Si une forte réduction des émissions de NO_x est toujours favorable à une diminution des concentrations d'ozone, une réduction limitée des NO_x peut dans certaines conditions aller à l'inverse du but recherché...

Des modélisations de la circulation des masses d'air pollué à l'échelle de l'Europe réalisées dans le cadre du programme EMEP (Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long Range Transmission of Air Pollutants in Europe) montrent par exemple, sur une saison représentative, qu'une diminution générale de 80% des émissions de COV conduit en moyenne à une diminution de l'ordre de 30% des indices AOT40.

Si l'on rapporte le bénéfice d'une telle réduction en France aux émissions anthropiques françaises de COV (près de 2 millions de tonnes en 1989), opération qui est faite implicitement lorsqu'un ensemble de pays décide de réduire leurs émissions d'un même pourcentage, on obtient un ratio de :

C agricole ozone : 3 000 FF / tonne COV

L'effet d'une réduction importante des émissions de NO_x dans la couche de mélange européenne serait d'une efficacité comparable celle relative aux COV. La modélisation des équilibres chimiques de la troposphère libre laisse en outre supposer que lorsque l'on diminue les émissions mondiales d'oxydes d'azote de 20% par exemple, cela entraîne une diminution des concentrations d'ozone dans la troposphère libre de 10% environ. On peut donc considérer l'hypothèse globale où une réduction de 80% des oxydes d'azote anthropiques (près de 1,8 millions de tonnes en France en 1989) diminuerait de 40% les indices AOT40. On aurait ainsi :

C agricole ozone : 4 500 FF / tonne NO_x

Un solde de dommages, difficile à répartir, serait, dans cette logique, attribuable aux émissions mondiales de méthane et d'oxyde de carbone.

6 L'effet climatique de l'usage des combustibles fossiles

Le niveau des températures à la surface de la terre résulte d'un équilibre entre, d'une part, l'apport de chaleur par le rayonnement solaire, d'autre part, le refroidissement de la terre suivant trois modes : échange convectif avec l'atmosphère, évaporation d'eau (chaleur latente), rayonnement thermique (infra-rouge).

Une fraction de l'énergie rayonnée depuis la surface terrestre est interceptée par l'atmosphère, plus précisément par des gaz tels que la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone CO_2 . Cette énergie, rediffusée par ces gaz dans toutes les directions, est donc en partie renvoyée vers la surface terrestre : c'est ce qu'on appelle l' "effet de serre". Sans cet effet de serre, c'est à dire s'il n'y avait pas de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, la température moyenne à la surface de la terre ne serait que de -18°C . Grâce à l'effet de serre, la température moyenne s'établit à 15°C .

6.1 Le rôle des combustibles fossiles dans la production de gaz à effet de serre

L'utilisation des combustibles fossiles est le principal facteur de l'accroissement de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère que l'on constate actuellement (cf. ci-dessus). Cet accroissement induit un renforcement de l'effet de serre et tend par conséquent à provoquer une augmentation des températures moyennes à la surface de la terre.

Le dioxyde de carbone n'est cependant pas le seul gaz à effet de serre dont la concentration varie en fonction des consommations de combustibles fossiles. Un autre rejet important de ce point de vue est le méthane : une molécule de méthane dans l'atmosphère a un effet radiatif 32 fois plus important qu'une molécule de dioxyde de carbone. En tenant compte de sa durée de vie plus courte, on évalue que, sur une période de 100 ans, une tonne de CH_4 relachée dans l'atmosphère a un "Potentiel d'Échauffement Global" (PEG) équivalent à 11 tonnes de CO_2 .

L'ozone est également un gaz à effet radiatif. Il en résulte que les émissions d'oxyde de carbone, de composés organiques volatils et, à nouveau, de méthane sont indirectement génératrices d'effet de serre parce qu'elles tendent à accroître les concentrations d'ozone dans la troposphère. Ces mêmes émissions sont également génératrices d'effet de serre dans la mesure où elles tendent à réduire les concentrations dans l'atmosphère du radical hydroxyle OH, qui est un agent de destruction du méthane et d'autres gaz à effet de serre tels que les HCFC utilisés en réfrigération.

L'impact sur l'effet de serre des émissions de NO_x est, à l'heure actuelle, mal évalué : d'un côté, elles tendent à accroître les concentrations d'ozone, d'un autre côté, elles accroissent les concentrations en radical OH et favorisent ainsi la destruction de méthane...

Les aérosols atmosphériques produits du fait de l'emploi des combustibles fossiles, notamment les sulfates, ont aussi un effet climatique mais qui joue dans le sens inverse de l'effet de serre : par un phénomène de diffusion de la lumière, ils empêchent une partie du rayonnement solaire d'atteindre la surface terrestre et induisent un refroidissement dans les zones polluées.

Au total, les émissions de CO₂ sont actuellement le facteur majeur du renforcement de l'effet de serre.

Ce facteur est un facteur cumulatif. Cela signifie, par exemple, que si l'on voulait stabiliser l'effet de serre lié au CO₂ à son niveau actuel, il ne faudrait pas seulement stopper la progression des émissions de CO₂ ; il faudrait stabiliser le stock de CO₂ dans l'atmosphère, c'est à dire limiter les flux d'émission au niveau des flux de disparition. Cela exigerait de ramener les émissions mondiales de CO₂ à environ la moitié de leur niveau actuel, et de se maintenir à ce plafond dans l'avenir.

Comment peuvent évoluer les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère suivant les hypothèses que l'on retient en matière d'évolution des émissions ? Les experts de l' "Intergovernmental Panel on Climate Change" (IPCC) mis en place sous l'égide de l'ONU ont étudié différents scénarios . Dans le scénario de référence, la concentration de gaz à effet de serre (en CO₂-équivalent) atteint au cours du prochain siècle - vers 2070 - un niveau double du niveau préindustriel, tandis que les émissions de CO₂ passent de 28 milliards de tonnes par an en 1990 à 75 milliards de tonnes en 2100.

Ce scénario pourrait être qualifié de "tendanciel/modéré" car il suppose, d'une part, une croissance du PIB mondial par habitant sensiblement inférieure à celle qui a été observée au cours des dernières décennies (population mondiale de 11,3 milliards d'habitants en 2100, taux de croissance économique moyen de 2,3%/an sur la période), d'autre part, une réduction de l'intensité énergétique (diminution de 1,2%/an de la quantité de CO₂ émise par unité de production). Il faut souligner que le doublement de la concentration de gaz à effet de serre n'est qu'un point de repère particulier ; sauf en cas de mise en oeuvre de politiques radicales à l'échelle mondiale, cette concentration poursuit sa croissance exponentielle au delà du XXIème siècle.

6.2 La relation entre concentrations de gaz à effet de serre et température

Les températures moyennes à la surface de la terre ont augmenté d'environ 0,3 à 0,6°C au cours des 100 dernières années, avec des profils de croissance irréguliers.

L'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre enregistrée depuis le début de l'ère industrielle implique un "forçage radiatif", c'est à dire une variation du niveau global d'énergie intercepté par l'atmosphère de l'ordre de $2,5 \text{ W/m}^2$ (sur un total de 240 W/m^2 d'énergie rayonnée par la planète) ; l'augmentation de température qui correspond à ce niveau de forçage est un peu supérieure à 1°C .

On suppose que l'effet de serre additionnel a été partiellement masqué, jusqu'à présent, par deux effets antagonistes : d'une part, l'effet de refroidissement dû aux sulfates (1 W/m^2 dans l'hémisphère nord), d'autre part, la diminution des concentrations d'ozone dans la stratosphère.

Il est clair au demeurant que des variations de température d'amplitude faible, telles que celles qui résulteraient actuellement de l'effet de serre, sont difficiles à distinguer des variations naturelles de température de la terre. Les observations actuelles ne sont donc pas contradictoires avec les modèles de prévision de l'impact climatique, mais ne permettent pas non plus de les valider.

Dans l'hypothèse d'une poursuite de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, à quelles conséquences peut-on s'attendre ? Un point de référence classique est de considérer l'impact d'un doublement des concentrations de CO_2 (ou d'équivalent- CO_2) par rapport au niveau préindustriel. Ce doublement correspond à un forçage radiatif de $4,4 \text{ W/m}^2$; l'IPCC estime que l'élévation de la température moyenne à la surface de la terre qui en résulterait serait probablement comprise entre $1,5^\circ\text{C}$ et $4,5^\circ\text{C}$, "l'estimation la plus probable" étant de $2,5^\circ\text{C}$.

L'incertitude qui affecte ce dernier chiffre ne porte pas sur le mécanisme primaire d'effet de serre, qui est assez bien modélisé, mais sur les diverses boucles de rétro-action qui viennent compliquer le système climatique :

- * l'effet de serre dû au CO_2 , élevant la température de l'eau de mer, accroît l'évaporation ; cette vapeur d'eau crée un effet de serre additionnel ;
- * l'effet de serre modifie les conditions de formation des nuages ; le type de nuages formé (altitude, propriétés optiques) intervient dans le bilan radiatif de l'atmosphère et est un élément d'incertitude important ;
- * le changement climatique peut entraîner une variation des superficies enneigées et, par conséquent, une variation de la part du rayonnement solaire incident directement réfléchi par la terre (albedo de la terre).

6.3 La nature des conséquences climatiques

Le paramètre de "température moyenne à la surface de la terre" est un indicateur global qui recouvre en fait une évolution complexe des climats. Les modèles climatiques laissent prévoir des phénomènes tels que :

- * un refroidissement de la stratosphère ;
- * un réchauffement supérieur à la moyenne pour les latitudes élevées (jusqu'à 8°C) et inférieur à la moyenne pour les zones tropicales ;
- * un accroissement des précipitations (de 10 à 15% ?), tenant au fait que l'atmosphère est globalement plus humide, accroissement qui s'observerait toute l'année aux latitudes élevées mais seulement en hiver aux latitudes moyennes ;
- * un assèchement des sols dans les zones de latitude moyenne de l'hémisphère nord par suite de l'accroissement de l'évaporation en été ; cela pourrait concerner par exemple le sud de l'Europe ;
- * un réchauffement estival supérieur à la moyenne au dessus des continents de latitude moyenne de l'hémisphère nord parce que, du fait de l'assèchement des sols, il y aurait diminution de l'évaporation donc réchauffement du sol (5 à 6°C au dessus de l'Asie)...

Il n'est pas impossible qu'une telle évolution s'accompagne d'une variation de la fréquence de certains événements climatiques extrêmes. Une des conditions de la formation de cyclones tropicaux est que la température de surface de la mer soit supérieure à 26°C, ce qui devrait concerner des régions plus importantes. Aux latitudes moyennes, les tempêtes dépendent du gradient des températures entre pôle et équateur : on s'attend à ce que ce gradient diminue au niveau du sol, mais augmente en altitude... Les risques de sécheresse dans certaines régions peuvent favoriser les incendies ; les modifications dans le régime des précipitations sont susceptibles d'avoir des conséquences en termes d'inondations ou d'érosion...

Une modification climatique pourrait avoir, on le sait, un impact sur le niveau des mers. Cet impact serait la résultante de plusieurs facteurs : d'une part un effet de dilatation thermique des océans et une fonte des glaciers de montagne, d'autre part, un accroissement des précipitations neigeuses et donc des stocks de neige sur l'Antarctique ; au total, il est probable que l'élévation du niveau des mers pour un doublement des concentrations de CO₂ serait comprise entre 0 à 60 cm.

De nombreux autres facteurs doivent être pris en compte dans la prévision des effets climatiques. L'océan joue un rôle essentiel comme réservoir et régulateur thermique et comme réservoir de CO₂. Il existe également des interactions complexes entre l'évolution de la biomasse terrestre, qui est un stock de

carbone, et l'évolution du climat et des concentrations de CO₂. Ces facteurs sont actuellement l'objet de recherches.

6.4 *Évaluation des impacts*

Les modifications climatiques évoquées précédemment sont susceptibles d'avoir des impacts importants sur l'évolution des écosystèmes naturels, notamment dans les régions de latitude élevée ou les continents de latitude moyenne. Une évolution rapide du climat rend précaire les migrations des êtres vivants ou leur évolution adaptative ; elle devrait entraîner une accélération des disparitions d'espèces et d'écotypes.

Les modifications climatiques auraient également des conséquences appréhendables en termes économiques. Parmi les secteurs concernés, on peut citer :

- * l'agriculture, sur laquelle les impacts seront très variables suivant les conditions locales : l'accroissement des concentrations de CO₂ favorise la photosynthèse ; l'augmentation des précipitations est un élément favorable lorsque l'eau est le facteur limitant ; la température a des effets complexes ; cependant le phénomène le plus important pourrait être la tendance à l'assèchement en été des zones continentales aux latitudes moyennes ; un pays comme la Chine serait particulièrement touché ;
- * la gestion de la ressource en eau : elle constitue un problème préoccupant pour de nombreux pays ; le changement climatique ajoute un facteur supplémentaire d'incertitude ;
- * le secteur énergétique : il y aurait diminution des besoins de chauffage, accroissement de la demande de climatisation, variation de la ressource hydro-électrique...
- * la santé : l'adoucissement du climat hivernal, mais plus encore, semble-t-il, la fréquence accrue de vagues de chaleur en été se traduisent en termes de qualité de vie et de santé, un facteur d'accoutumance étant à prendre en compte ; le changement climatique peut également avoir une influence sur les vecteurs de transmission de certaines maladies (paludisme)...

Bien qu'une évaluation quantitative des effets précédents soit évidemment problématique, des tentatives ont été faites dans ce sens, notamment aux États Unis. Les estimations relatives à chacun des postes divergent, mais il y a une sorte de convergence sur l'ordre de grandeur de l'impact global. En se plaçant dans la situation conventionnelle du doublement de la concentration de CO₂ et d'une élévation de la température moyenne de 2,5°C, les estimations du coût des dommages monétarisables sont de l'ordre de 1 à 2% du PIB.

On peut penser que les pays moins développés, où le secteur agricole a un poids plus lourd, seraient plus affectés par le changement climatique que les pays riches, qui disposent d'une plus grande capacité technique et financière d'adaptation. Une hypothèse de référence est d'associer au doublement de la concentration de CO₂ un coût de 2% du PIB mondial.

6.5 *Le coût virtuel de l'émission d'une tonne de carbone*

On peut, sur la base de cette évaluation globale du coût de l'effet de serre, et en se plaçant dans un certain cadre d'hypothèses, associer à chaque tonne de carbone émise sous la forme CO₂ un coût virtuel de dommages. Nous l'illustrerons très schématiquement.

L'émission d'une tonne de carbone augmente initialement la concentration de l'atmosphère en gaz carbonique d'une quantité dC ($dC = 4,7 \cdot 10^{-10}$ ppm). Elle accroît le forçage radiatif de dF ($dF \approx 8,4 \cdot 10^{-12}$ W/m² suivant la loi formulée par Arrhenius en 1896). L'effet, direct et indirect, de ce forçage élève la température d'équilibre à la surface de la terre de dT (valeur la plus probable : $dT \approx 4,8 \cdot 10^{-12}$ °C).

Si on suppose que cette émission de carbone intervient dans un contexte d'accroissement de l'effet de serre, que le dommage résultant est proportionnel à l'augmentation de température, et si on considère qu'une augmentation de température de 2,5°C se traduit par un dommage annuel de 2 % du PIB mondial, soit 400 milliards de dollars, on peut attribuer à l'émission d'une tonne de carbone, au cours de l'année d'émission, un dommage $D_0 = 0,77$ \$/t C.

La quantité de carbone restant dans l'atmosphère, à la suite de cette injection initiale, diminue progressivement au cours du temps. Le dommage total attribuable à l'émission d'une tonne de carbone est la somme des dommages provoqués au cours des années successives par les quantités de carbone résiduelles.

Supposons, par exemple, qu'on prenne en compte les dommages durant une période de 200 ans, et que l'accroissement moyen de la concentration de CO₂ durant cette période soit égal au tiers de l'accroissement initial. Si on considère que la valeur actuelle d'un point de PIB pour toute année de la période prise en compte est égale à la valeur d'un point de PIB aujourd'hui, ce qui revient à retenir un taux d'actualisation égal au taux de croissance du PIB, on estimera que le coût actualisé D_a des dommages d'une émission de CO₂ vaut environ : $D_a \approx 50$ \$/t C.

Le calcul précédent est une illustration simplifiée de la démarche et des résultats de processus d'évaluation plus complexes : en fait la loi de décroissance des concentrations dépend des émissions futures de CO₂, le forçage radiatif d'un incrément de concentration dépend de la concentration de CO₂ préexistante et on peut supposer que le dommage induit par un

incrément de température dépend du niveau de température déjà atteint... Il en résulte notamment que le coût virtuel de l'émission d'une tonne de carbone devrait augmenter en fonction de la date d'émission, parallèlement à la montée de l'effet de serre.

Le choix du taux d'actualisation est un élément important de ce calcul comme de tout calcul économique portant sur de longues périodes. La problématique du développement durable suggère de choisir, comme cela a été fait ici, un taux bas.

L'incertitude sur les valeurs des principaux paramètres est un autre élément du problème : la réponse à un doublement des concentrations de CO₂ peut être une augmentation de température de 4,5°C ou bien de 1,5°C et non pas de 2,5°C ; le dommage résultant d'une augmentation de température de 2,5°C peut être de 3% ou 4% ou bien de 1% du PIB et non pas de 2%... Pour prendre en compte cet élément dans le calcul précédent, il faudrait, au lieu de donner des valeurs fixes aux principaux paramètres du problème, leur associer des distributions de probabilité. Des distributions log-normales sont classiques dans un tel cas ; elles permettent de prendre en compte le fait qu'il existe une probabilité faible mais non négligeable que la valeur d'un paramètre soit sensiblement supérieure à ce qui est considéré comme l'estimation la plus probable.

On calcule alors, non plus une valeur unique du coût de la tonne de carbone, mais une distribution des valeurs probables de cette tonne de carbone. La valeur moyenne de cette distribution, c'est à dire "l'espérance mathématique" D_e du coût de la tonne de carbone peut être sensiblement supérieure à la valeur calculée précédemment, comme produit des valeurs les plus probables des paramètres. Par exemple, si on suppose que le coût de la tonne de carbone est distribué suivant une loi log-normale et que la valeur la plus probable est $D_a \approx 50$ \$/t C, la valeur moyenne de la distribution sera $D_e \approx 75$ \$/t C (500 FF/t C).

Ce mode de calcul du "coût probable actualisé" des dommages liés à l'émission d'une tonne de carbone fossile aboutit à un coût de dommage qui se situe à un niveau proche du niveau de la taxe sur les émissions de carbone fossile (10 \$/baril) proposée par les instances européennes. On pourrait évaluer suivant une démarche similaire les coûts associés à l'émission d'autres gaz à effet de serre (CH₄) ou de précurseurs de tels gaz (NO_x).

La démarche d'évaluation précédente, outre le caractère très approximatif des estimations, présente des limites théoriques évidentes :

- * elle est micro-économique, c'est à dire qu'elle ne considère que les impacts économiques directs ; étant donnée l'ampleur de ces impacts, une approche macro-économique serait nécessaire ;

- * elle ne peut prendre en compte que les dommages monétarisables ; savoir quels dommages sont monétarisables est l'objet de débats...

Certains estiment d'ailleurs que le véritable problème qui est posé par l'effet de serre n'est pas celui de l'évaluation de dommages d'ampleur encore limitée tels que ceux évoqués ci-dessus à l'horizon du prochain siècle. Il est celui d'un risque, qui paraît faible en l'état actuel des connaissances, mais que l'on ne peut exclure, d'enchaînements catastrophiques : dégagement, du fait du réchauffement climatique, d'une partie du méthane immobilisé sous forme d'hydrates de méthane dans les sédiments des mers froides et dans le permafrost ; désintégration de la couverture glaciaire de l'Ouest de l'Antarctique ; bouleversement des courants océaniques...

Les deux points de vue sont sans doute complémentaires ; le calcul du coût des dommages nous a du moins permis d'explicitier certains des paramètres du problème de l'effet de serre.

Conclusion

Nous n'avons évoqué ici que quelques uns des impacts connus de l'utilisation des combustibles fossiles. Pour emprunter une image au domaine de l'économie des matières premières et des ressources en combustibles fossiles, on peut penser qu'il existe, au delà des impacts recensés, un gisement d'impacts encore inconnus mais néanmoins réels.

On aura constaté que toute évaluation d'impact sur l'environnement est affectée d'un fort coefficient d'incertitude. L'environnement est un système extrêmement complexe, dont la science ne saisit certainement pas tous les rouages, et sur lequel on ne peut pas faire d'expérimentation à l'échelle globale.

Évaluer des impacts sur l'environnement, c'est construire un "modèle" de ce système. Si une part des éléments du modèle est constituée de faits établis de manière incontestable, on fait appel, pour une autre part, aux hypothèses scientifiques qui paraissent les plus vraisemblables... En explicitant certaines de ces hypothèses, nous souhaitons favoriser leur discussion, qui est une partie essentielle de toute évaluation d'impact.

L'Environnement n'est certainement pas le seul domaine où les décisions doivent être prises dans une situation d'incertitude, avec des enjeux importants. Le pétrolier ou le mineur, par exemple, en font l'expérience chaque jour dans leur domaine. Même ou surtout dans un tel contexte, il nous paraît important de mettre au clair ce que l'on connaît de la situation.

Quelques sources complémentaires d'information :

Ministère des Affaires Sociales, de la Santé et de la Ville, Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France : Particules en suspension dans l'atmosphère ; effets sur la santé et proposition pour une révision des valeurs limites, Paris 1993.

Guy Landrieu : An evaluation of some health risks of the pollution from fossil fuel combustion (Workshop "Economic evaluation of damage caused by acidifying pollutants" , Londres, 1994) ; INERIS.

Académie des Sciences : Ozone et propriétés oxydantes de la troposphère, Lavoisier, Paris 1993.

Académie des Sciences : Rapport sur l'effet de serre et ses conséquences climatiques, Paris 1990.

